Vol.12, No.1, Spring 2023, pp.209-228 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.74312.1148 Open access

Investigating Temporal-Spatial Distribution and the Possibility of Wind Gust Prediction in Iran

Mohammad Hesam Mohammadi[a], Amir Hussain Meshkatee[b], Sarmad Ghader[c*], Majid Azadi[d]

[a] *PhD Candidate, Department of Earth Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran*
[b] *Associate Professor, Department of Earth Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran*
[c] *Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*
[d] *Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran*

Received: 27 November 2021 ***Revised: 15 January 2022*** ***Accepted: 18 February 2022***

Abstract

Today we are witnessing a multitude of destructive natural meteorological and hydrological phenomena that cause more financial and environmental losses to human life. One of the atmospheric phenomena that can have a direct impact on flight safety, transportation, structures, energy and many other aspects of human life is wind gust. The aim of this study was to investigate the temporal and spatial distribution of wind gust in Iran over a period of 15 years and to evaluate an experimental method called WPD to predict this phenomenon using the output of the WRF model. For this purpose, the data recorded in 32 synoptic stations between 2004 and 2018 were studied. The results showed that the number of wind gusts occurred in the southeast and northwest Iran was much higher than other regions, while the frequency of convective wind gusts has been higher in the western half of Iran. In general, the frequency of wind gust had an increasing trend during the studied period and reached its maximum in 2018. Moreover, most convective wind gust reports have been related to spring. The highest number of wind gust reports with 67% belonged to the first half of the year. However, only 13% of the reports belonged to the autumn. Most of the wind gusts were reported between 12:00 and 18:00 local standard time (0800 to 1400 UTC). Among several wind gust forecasting methods, the relationship used in the WRF post processing system (WPD) was selected and its performance in Iran was evaluated. The results of the method on 885 non-convective wind gust indicated the optimal performance of the method for forecasting wind gust in Iran (RMSE=3.23, MAE=2.83, MSE=13.4 and R=0.71).

Keywords: Atmospheric Hazards, Non-convective, Verification, Wind Gust, WRF

* Corresponding author: Sarmad Ghader E-mail: sghader@ut.ac.ir Tel: +982161118373

How to cite this Article: Mohammadi, M. H., Meshkatee, A. H., Ghader, S., & Azadi, M. (2023). Investigating temporal-spatial distribution and the possibility of wind gust prediction in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(1), 209-228.

DOI: 10.22067/geoeh.2022.74312.1148

Geography and Environmental Hazards
Volume 12, Issue 1 - Number 45, Spring 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74312.1148

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارهٔ چهل و پنجم، بهار ۱٤۰۲، صص ۲۲۸-۲۰۹

مقاله پژوهشی

بررسی توزیع زمانی- مکانی و امکان پیش‌بینی جست‌باد در ایران

محمد حسام محمدی – دانشجوی دکتری، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
امیرحسین مشکوتی – دانشیار، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
سرمد قادر[1] – دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مجید آزادی – دانشیار، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۹/٦ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۰/۱۰/۲۵ تاریخ تصویب: ۱٤۰۰/۱۱/۲۹

چکیده

امروزه شاهد انبوهی از پدیده‌های مخرب طبیعی هواشناسی و هیدرولوژیکی هستیم که هرساله تلفات و خسارات مالی و زیست‌محیطی بیشتری به زندگی بشر وارد می‌کنند. یکی از پدیده‌های جوی که می‌تواند بر ایمنی پرواز، حمل‌ونقل، سازه‌ها، انرژی و بسیاری دیگر از جنبه‌های زندگی بشری اثر مستقیم داشته باشد، جست‌باد است. هدف از این مطالعه، بررسی توزیع زمانی-مکانی جست‌باد در کشور ایران در یک بازهٔ زمانی ۱۵ ساله و ارزیابی یک روش تجربی تحت عنوان WPD جهت پیش‌بینی این پدیده با استفاده از برونداد مدل WRF است. بدین‌منظور داده‌های ثبت شده در ۳۲ ایستگاه همدیدی بین سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ میلادی موردمطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد تعداد دفعات وقوع جست‌باد در مناطق جنوب شرق و شمال غرب کشور به‌مراتب بیشتر از سایر مناطق بوده است؛ درحالی‌که فراوانی وقوع جست‌بادهای همرفتی در نیمه غربی کشور بیشتر بود. به‌طورکلی، فراوانی وقوع جست‌باد در بازه موردمطالعه روندی صعودی داشته و اغلب گزارش‌های جست‌باد همرفتی مربوط به فصل بهار بوده است. در مجموع، ٦۷ درصد جست‌بادها در نیمه اول سال گزارش گردیده‌اند و تنها ۱۳ درصد از آن‌ها در فصل پاییز اتفاق

[1] نویسنده مسئول: ۰۹۸۲۱٦۱۱۱۸۳۷۳ Email: sghader@ut.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

مدی, محمد حسام, مشکوتی, امیرحسین, قادر, سرمد, آزادی, مجید. (۱٤۰۲). بررسی توزیع زمانی- مکانی و امکان پیش بینی جست باد در ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی, ۱۲(۱). صص ۲۲۸-۲۰۹

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74312.1148

افتاده‌اند. همچنین محتمل‌ترین زمان وقوع جست‌باد بین ساعت‌های ۱۸-۱۲ محلی بوده است. در ادامه و از میان روش‌های پیش‌بینی جســـت‌باد، رابطه مورداســـتفاده در ســـامانه پس‌پردازش یکپارچه مدل WRF (WPD) انتخاب و عملکرد آن در کشور ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش پیش‌گفته بر روی ۸۸۵ مورد جست‌باد غیرهمرفتی، حاکی از عملکرد مطلوب این روش جهت پیش‌بینی جست‌باد در ایران بود.

کلید واژه‌ها: ارزیابی، جست‌باد، غیرهمرفتی، مخاطرات جوی، WRF.

۱- مقدمه

امروزه شاهد انبوهی از پدیده‌های مخرب طبیعی هواشناسی و هیدرولوژیکی هستیم که هرساله تلفات و خسارات مالی و زیست‌محیطی بیشتری به زندگی بشر وارد می‌کنند. تأثیر این بلایا به‌سرعت در سراسر جهان منتشر می‌شود. در فهرست مخرب‌ترین رویدادهای جوی به‌وقوع پیوسته در سالیان گذشته در مناطق مختلف جهان، نام جست‌باد[۱] به‌دفعات به چشم می‌خورد. جست‌باد، افزایش ناگهانی و کوتاه‌مدت تندی باد است. بنابر تعریف، جست‌باد زمانی گزارش می‌شود که بیشینه تندی باد به بالای ۸ متر بر ثانیه برسد و اختلاف بیشینه تندی باد با باد میانگین، حداقل ۵ متر بر ثانیه باشد. مدت‌زمان این پدیده معمولاً کمتر از ۲۰ ثانیه است (انجمن هواشناسی آمریکا (AMS[۲])، ۲۰۱۸).

جست‌باد پیامدهای زیادی بر بسیاری از بخش‌ها دارد، به‌عنوان‌مثال، این پدیده بر طراحی و ساختار ساختمان‌ها و پل‌ها تأثیر می‌گذارد. هنگامی‌که تندی جست‌باد از یک آستانه معین فراتر می‌رود، به دلیل اثر ناشی از تغییرات و نوسان ناگهانی آن بر سازه‌ها، می‌توان آسیب به ساختمان‌ها و یا پل‌ها را انتظار داشت. در حوزه بهره‌برداری از انرژی بادی، اطلاعات باد از چندین جهت حائز اهمیت است. در مرحله برنامه‌ریزی، طراحان توربین‌های بادی نیاز دارند از ماهیت بادها و شرایط تلاطم‌های جوی منطقه آگاهی داشته و همچنین چشم‌اندازی از دوره‌های زمانی جست‌باد شدید داشته باشند تا از عملکرد و استحکام ساختار توربین مطمئن شوند (بورتون و همکاران[۳]، ۲۰۱۱). در حوزه تهدیدات و تلفات انسانی، می‌توان به فستیوال موسیقی در بلژیک در تابستان سال ۲۰۱۱ اشاره نمود که جست‌باد با تندی بین ۲۹ تا ۳۷ متر بر ثانیه، باعث مرگ ۵ نفر و مجروح شـدن بیش از ۱۴۰ نفر گردید (دی میوتر و همکاران[٤]، ۲۰۱۵). نمونه دیگری از این پدیده در تاریخ ۹ ژوئن ۲۰۱٤ در غرب اروپا به وقوع پیوست که بیشینه سرعت جست‌باد تا ٤۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد و طی آن ٦ نفر فوت کرده و حدود ٦٥۰ میلیون یورو خسارت وارد گردید (موهر و همکاران[٥]، ۲۰۱۷).

1 Wind gust
2 American Meteorological Society. Wind gust definition, https://glossary.ametsoc.org/wiki/Gust
3 Burton et al.
4 De Meutter et al.
5 Mohr et al.

اگرچه گزارش‌های ثبت شده جست‌باد معمولاً پراکنده و محدود است؛ اما تهدیدها و خسارات ناشی از آن، مطالعه و شناخت این پدیده را بسیار حائز اهمیت می‌کند. جست‌بادها می‌توانند به ۳ دلیل اصلی ایجاد گردند (کُلندُویچ و همکاران[۱]، ۲۰۱۶). یکی از آن‌ها گردش‌های جوی چرخندی و گرادیان افقی فشار همراه با این گردش‌ها است. دلیل دوم، ایجاد جست‌بادهای همرفتی ناشی از حضور ابرهای توفان‌زا مانند ابرهای کومه‌ای بارا[2] است که شرایط ایجاد جریان‌های شدید نزولی هوا (انفجارات پایین‌سو[۳]) را در زیر خود به‌وجود می‌آورند. بر اثر برخورد این جریانات با سطح زمین، هوای شامل این جریانات نزولی توسط سطح منحرف شده و باعث ایجاد جست‌باد می‌گردد. دلیل سوم ایجاد تلاطم ناشی از اصطکاک، چینش باد یا گرمای سطح زمین است که این سه سازوکار می‌توانند باد را وادار به تغییر تندی و همچنین جهت کنند.

در این مطالعه، ابتدا به بررسی توزیع زمانی و مکانی جست‌باد در کشور ایران در یک بازه زمانی ۱۵ ساله پرداخته خواهد شد. شناخت مکان‌های مستعد وقوع این پدیده و همچنین روند و بازه‌های تکرار آن در مقیاس‌های روزانه و سالیانه، می‌تواند به آگاهی ما از این پدیده مخرب جوی و درنتیجه انجام اقدامات پیشگیرانه در زمینه کاهش اثرات زیست‌محیطی آن کمک کند. در بخش بعدی تلاش خواهد شد تا امکان پیش‌بینی تندی جست‌باد توسط یک روش تجربی (WPD[4]) بر اساس برونداد مدل میان‌مقیاس WRF در منطقه ایران، موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد. ازآنجاکه استفاده عملیاتی از مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا در چند سال اخیر در ایران متداول شده و هنوز مطالعه‌ای برای راست‌آزمایی همه محصولات مدل انجام نشده است، چنین مطالعاتی ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور ابتدا به تعریف رابطه WPD که در حال حاضر در سامانه پس‌پردازش یکپارچه مدل WRF (UPP) به‌کار گرفته می‌شود پرداخته خواهد شد و پس از انتخاب پیکربندی و دامنه مناسب، مدل WRF برای ۵۷ تاریخ منتخب به‌صورت ۲۴ ساعته اجرا خواهد گردید. درنهایت نتایج پیش‌بینی حاصل از روش WPD با بهره‌گیری از سنجه‌های آماری خطای مطلق میانگین (MAE)، میانگین مربع خطا (MSE)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (R)، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. مطالعات مشابه دیگری در ایران و سایر نقاط جهان در خصوص بررسی آماری پدیده‌های جوی و همچنین ارزیابی مدل‌های عددی پیش‌بینی جو صورت گرفته است که به‌عنوان نمونه به چندین مورد از آن‌ها اشاره خواهد شد.

کُلندُویچ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی جست‌بادهای همرفتی و غیرهمرفتی در لهستان از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بیشترین تهدید از لحاظ تکرار و شدت حداکثر جست‌باد همرفتی در ماه ژوئیه اتفاق می‌افتد. جست‌بادهای غیرهمرفتی در ماه ژانویه بیشتر اتفاق می‌افتند و وقوع آن‌ها در تابستان نادر است.

1 Kolendowicz et al.
2 Cumulonimbus
3 Downburst
4 WRF Post-process Diagnostic of wind gust

آن‌ها همچنین نشان دادند که همرفت اثر زیادی در تشدید جست‌باد دارد و شدت وقوع جست‌بادهای همرفتی بیشتر از غیرهمرفتی است.

فریرا و ناسیمنتو[1] (۲۰۱۶) به مطالعه جست‌بادهای شدید همرفتی در برزیل در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تکرار جست‌باد با سرعت برابر یا بیشتر از ۲۵ متر بر ثانیه، در فصل بهار اتفاق می‌افتد و از لحاظ زمانی نیز بیشترین فراوانی از حدود ظهر تا بعدازظهر و پس از آن در طول شب بوده است.

استوکی و همکاران[2] (۲۰۱۶) به ارزیابی ٤ روش پیش‌بینی تندی جست‌باد در کشور سوئیس پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر ٤ روش ارزیابی شده تا حد زیادی وقوع جست‌باد را به‌درستی پیش‌بینی می‌کنند، اگرچه زمان و بزرگی بیشینه تندی باد، خیلی دقیق نبوده است.

کورباتوا و همکاران[3] (۲۰۱۸)، هفت روش مختلف برای پیش‌بینی تندی جست‌باد با استفاده از مدل WRF را در کشور روسیه موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهاد شده هیبریدی، توازن خوبی بین احتمال تشخیص و برآورد نسبت هشدار خطا نشان می‌دهد.

موهر و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی خصوصیات آماری جست‌بادهای همرفتی در کشور آلمان پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تعداد دفعات وقوع جست‌بادهای همرفتی، مشابه با تعداد دفعات وقوع توفان‌های تندری، از جنوب به شمال کشور آلمان روند کاهشی دارد. همچنین شدت وقوع آن‌ها طی ۲۰ سال گذشته در حال افزایش بوده است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد برخی روش‌های موجود پیش‌بینی تندی جست‌باد با استفاده از مدل WRF پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روشی که در پس‌پردازش یکپارچه مدل WRF (UPP) استفاده می‌شود نسبت به روش مورداستفاده در اداره هواشناسی انگلستان (Met office)، نتایج بهتری را برای منطقه ایران به همراه دارد.

همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی توزیع زمانی–مکانی جست‌باد و ارزیابی یک روش تجربی پیش‌بینی این پدیده تحت عنوان WPD در کشور ایران است. این پژوهش با توجه به خلأ موجود در زمینه شناخت و پیش‌بینی این پدیده مخاطره‌آمیز جوی و افزایش ایمنی حمل‌ونقل هوایی، دریایی و زمینی در کشور ایران صورت گرفته و نتایج حاصل از آن کاملاً کاربردی و عملیاتی بوده و علاوه بر پیشرفت‌های نظری و تئوری حاصل شده در حوزه موردبررسی، می‌تواند به‌عنوان مقدمه‌ای جهت پیش‌بینی دقیق جست‌باد در کشور ایران در نظر گرفته شود.

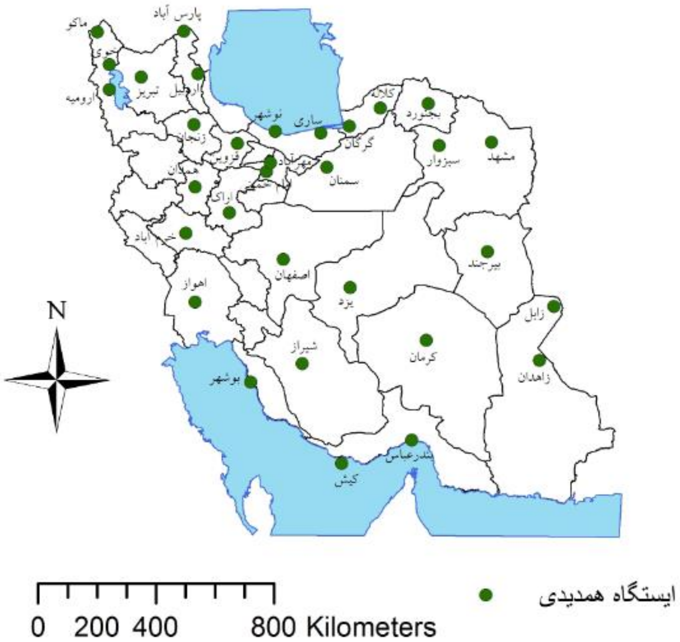
---

1 Ferreira and Nascimento
2 Stucki et al.
3 Kurbatova et al.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها، منطقه و بازه زمانی موردمطالعه

این مطالعه به بررسی جست‌باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین می‌پردازد (ارتفاع استاندارد WMO[1] جهت نصب ادوات اندازه‌گیری سرعت باد). داده‌های مورداستفاده مربوط به بازه زمانی سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ میلادی و شامل کلیه گزارش‌های متار و اسپیسی دریافتی از ۳۲ ایستگاه خودکار همدیدی سازمان هواشناسی ایران بود. سعی شد انتخاب ایستگاه‌ها به‌گونه‌ای باشد که کل کشور ایران را پوشش دهد. به‌صورت معمول اطلاعات باد میانگین و جست‌باد مربوط به ۱۰ دقیقه قبل از زمان ارائه گزارش‌های متار، برابر دستورالعمل ثبت می‌گردد. البته درصورتی‌که در بین ساعات دیده‌بانی نیز تغییر شدید و لحظه‌ای در تندی باد میانگین ایجاد شود، به‌طور جداگانه و به‌صورت گزارش‌های اسپیسی ثبت خواهد گردید. شکل (۱)، موقعیت ایستگاه‌های موردمطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های همدیدی مورداستفاده در مطالعه

۲-۲- روش‌های پیش‌بینی تندی جست‌باد

روش‌های مختلفی جهت پیش‌بینی جست‌باد بر پایه خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی، توسط سرویس‌های هواشناسی ملی و مراکز تحقیقاتی به‌کار برده می‌شود. جست‌بادها معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شوند: آن‌هایی که منشأ

1 World Meteorological Organization

همرفتی دارند و آن‌هایی که در محیط غیرهمرفتی به‌وجود می‌آیند. دسته اول عموماً مربوط به جریانات نزولی همرفتی و اختلاط قائم مربوط به همرفت عمیق هستند و دسته دوم اغلب مربوط به انتقال تلاطم در لایه‌مرزی است که معمولاً روش پیش‌بینی آن‌ها از طریق اندازه‌گیری انرژی جنبشی، بادهای لایه‌مرزی و در برخی موارد پایداری است (شریدن[1]، ۲۰۱۱ و برَسِر[2]، ۲۰۰۱).

تفکیک جست‌بادهای همرفتی از غیرهمرفتی به دلیل تفاوت در ماهیت شکل‌گیری آن‌ها، یک موضوع اساسی است و آگاهی از تفاوت آن‌ها در نوع شکل‌گیری، می‌تواند به شناخت بیشتر ما از این پدیده جوی منجر شود. روش‌های مختلفی برای این تفکیک ارائه شده است؛ از جمله بر اساس تصاویر راداری/ماهواره‌ای در زمان وقوع جست‌باد و یا جدا کردن آن‌ها با استفاده از جستجوی توفان‌های همراه با رعد و برق (توفان‌های تندری) در زمان ثبت گزارش‌های جوی. در این مطالعه از نتایج تحقیقات چوی و هدایت[3] (۲۰۰۲) و کوک و همکاران[4] (۲۰۰۳) استفاده گردید. آن‌ها آن دسته از گزارش‌های جست‌باد را که همراه با توفان تندری بود، به‌عنوان جست‌بادهای همرفتی و سایر گزارش‌ها را به‌عنوان جست‌بادهای غیرهمرفتی در نظر گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۹۹)، تعداد گزارش‌های جست‌باد غیرهمرفتی نسبت به نوع همرفتی در کشور ایران به مراتب بیشتر است. لذا به‌منظور توجه به اهمیت پدیده‌های پر مخاطره و پر تکرار جوی در کشور ایران، این مطالعه تنها بر روی جست‌بادهای نوع غیرهمرفتی متمرکز گردید.

مدل‌های پیش‌بینی جست‌باد غیرهمرفتی بر پایه تخمین یا محاسبه تلاطم در لایه‌مرزی و انتقال قائم تکانه، استوار هستند. تأثیر این محاسبات در مدل‌های مختلف، با روش‌های مختلف تشریح می‌شود. این روش‌ها می‌توانند حاصل از روابط فیزیکی (مانند رابطه تخمین جست‌باد (WGE[5] و یا روابط تجربی (مانند الگوریتم مورداستفاده در پروژه NIMROD[6] و یا رابطه مورداستفاده در سامانه پس‌پردازش (UPP[7] باشند.

در این مطالعه به‌منظور پیش‌بینی تندی جست‌باد غیرهمرفتی، از رابطه‌ای که در سامانه پس‌پردازش یکپارچه مدل WRF (UPP) به‌کار گرفته می‌شود (تحت عنوان WPD) استفاده گردید. این رابطه ازطریق برآورد بیشینه تکانه بالقوه که می‌تواند از بالای لایه‌مرزی تا سطح منتقل شود، تندی جست‌باد را پیش‌بینی می‌کند (رابطه ۱). کدنویسی اولیه

1 Sheridan
2 Brasseur
3 Choi and Hidayat
4 Cook et al.
5 Wind Gust Estimate method
6 Northern Illinois Meteorological Research On Downburst
7 Unified Post Processor

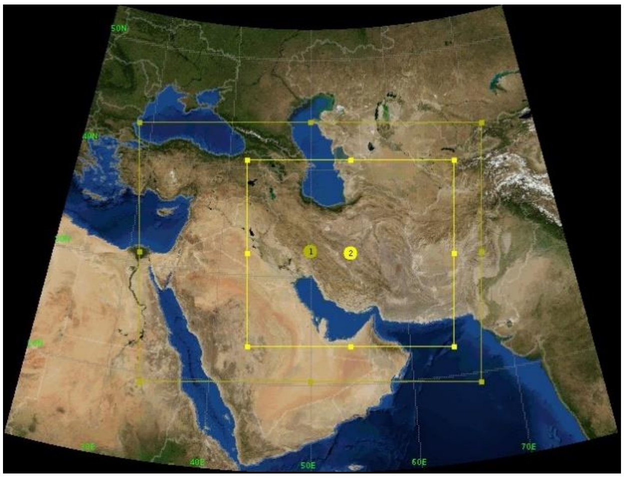
(NCO[1]، ۱۹۹۷) و مستندات پراکنده موجود حاکی از اقتباس این رابطه از الگوریتم مورداستفاده در فرایند پس‌پردازش مدل RUC20[2] می‌باشد (RUC20، ۲۰۰۷; همچنین شریدن، ۲۰۱۱ و استوکی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$Ug_{10} = U_{10} + (U_{PBL} - U_{10}) \times \left(1 - \frac{h_{PBL}}{2000}\right) \qquad (۱)$$

که در آن U_{10} تندی باد در ارتفاع ۱۰ متری و U_{PBL} تندی باد در تارک لایه‌مرزی (h_{PBL}) است. در این روش ارتفاع لایه‌مرزی عمیق (h_{PBL}>۱۰۰۰m)، ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مقدار $\frac{h_{PBL}}{2000}$ همواره کمتر از ۰/۵ خواهد بود.

۲-۳- مدل WRF

در این پژوهش از مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF نسخه ۳/۹ برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. مدل WRF یک مدل غیرهیدرواستاتیک (با گزینه هیدرواستاتیک) است که شبکه‌بندی آن شبکه C آراکاوا[3] است (اسکامارو ک[4]، ۲۰۰۸). تعداد آشیانه‌های انتخابی "دو آشیانه" و نسبت تفکیک افقی آشیانه‌ها ۱ به ۳ در نظر گرفته شد، به این معنی که این مدل با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر برای آشیانه اول و ۹ کیلومتر برای آشیانه دوم تنظیم گردید. شکل (۲) آشیانه‌های در نظر گرفته شده را جهت اجرای مدل نشان می‌دهد. آشیانه‌ها به‌صورت تو در تو بوده و با اندیس‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند.



شکل ۲- دو آشیانه در نظر گرفته شده جهت اجرای مدل WRF

1 NetCDF operators
2 Rapid Update Cycle
3 Arakawa C
4 Skamarock

در این مدل از نگاشت لامبرت استفاده شد و از داده‌های GFS با تفکیک ۰/۵ درجه با گام‌های زمانی سه‌ساعته به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردید. تعداد ترازهای قائم برابر با ٤٩ تراز در نظر گرفته شد. طرحواره‌های فیزیکی مورداستفاده مدل در جدول (۱) ارائه گردیدند. گام‌زمانی برای هر اجرای مدل ۹۰ ثانیه بوده و زمان اجرای هر شبیه‌سازی از ساعت UTC ۰۰ و برای یک روز کامل (٢٤ ساعت) در نظر گرفته شد که ٦ ساعت اول به‌عنوان زمان تطبیق[۱] و ۱۸ ساعت باقیمانده به‌عنوان زمان تحلیل در نظر گرفته شد.

جدول ۱- طرحواره‌های فیزیکی به‌کار گرفته شده جهت اجرای مدل WRF

طرحواره به‌کار گرفته شده	عنوان
Lin	(خرد فیزیک) mp_physics
RRTM	(تابش موج بلند) ra_lw_physics
Goddard	(تابش موج کوتاه) ra_sw_physics
Revised MM5	(لایه سطحی) sf_sfclay_physics
Noah	(سطح زمین) sf_surface_physics
YSU	(لایه‌مرزی سیاره‌ای) bl_pbl_physics
Kain-Fritsch	(همرفت) cu_physics

۲-٤- سنجه‌های آماری جهت ارزیابی نتایج

راستی‌آزمایی یک پیش‌بینی، فرآیندی است که کیفیت آن پیش‌بینی را تعیین می‌کند و می‌توان با کمک آن نتایج پیش‌بینی را ارزیابی نمود. برای راستی‌آزمایی کمیت‌های عددی پیوسته مانند دما، فشار و غیره، می‌توان از سنجه‌های آماری خطای مطلق میانگین (MAE)، میانگین مربع خطا (MSE)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) بهره گرفت که در این مطالعه نیز از آن‌ها استفاده گردیده و روابط آن‌ها به شرح ذیل است (جولیف و استفنسون[۲]، ۲۰۰۳):

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|F_i - O_i| \quad (۲)$$

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i - O_i)^2 \quad (۳)$$

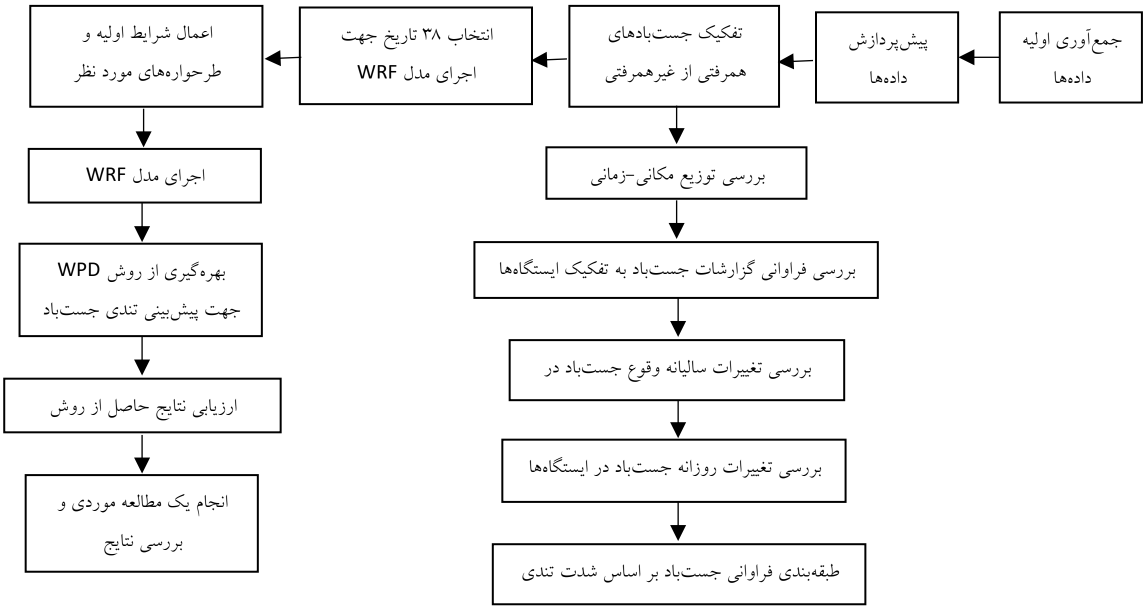
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i - O_i)^2} \quad (٤)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})\times(F_i-\bar{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2\times\sum_{i=1}^{N}(F_i-\bar{F})^2}} \quad (٥)$$

1 Spin up
2 Jolliffe and Stephenson

که در آن F_i مقدار پیش‌بینی شـــده متغیر مورد نظر و O_i مقدار دیدبانی شـــده متناظر با آن و N تعداد کل داده‌ها است. $\bar{F}$ و $\bar{O}$ به ترتیب میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و دیدبانی شده متغیر مورد نظر هستند.

مراحل انجام این مطالعه در بلوک دیاگرام زیر به‌صورت خلاصه توضیح داده شده است.



۳- نتایج و بحث

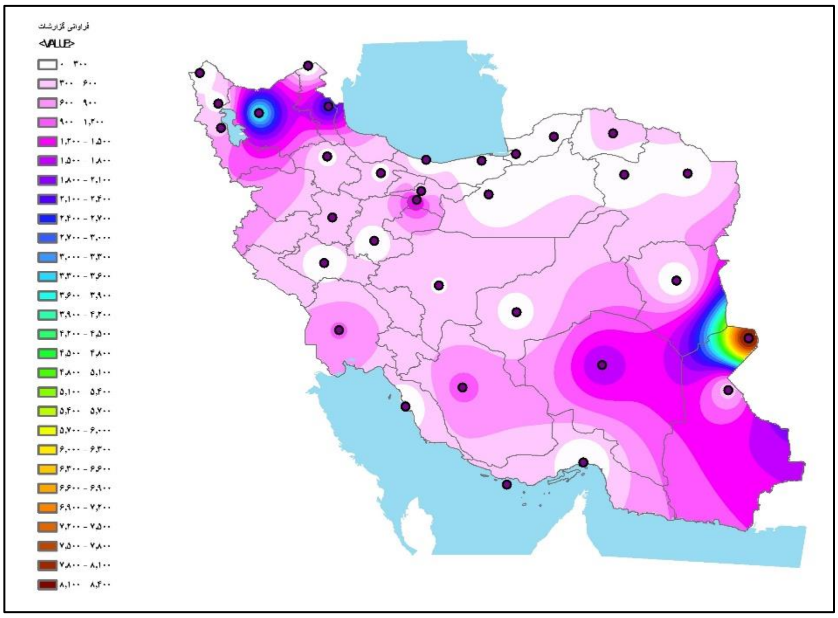
۳-۱- توزیع مکانی جست‌باد

در مجموع، گزارش‌های موجود شـــامل تعداد ۲۳۸۳۷ مورد جســـت‌باد بود که ٦۲۲ مورد از آن‌ها (حدود ۲/٦ درصـــد) از نوع همرفتی و ۲۳۲۱۵ مورد از نوع غیرهمرفتی بود. شـــکل‌های (۳) و (٤)، به ترتیب فراوانی کل گزارش‌های جســت‌باد و فراوانی گزارش جســت‌بادهای همرفتی را در کشــور ایران نشــان می‌دهند. این شــکل‌ها با اسـتفاده از روش درونیابی کریجینگ توسـط نرم‌افزار ArcMap ترسـیم شـده‌اند. همان‌طور که از شـکل (۳) مشـخص است، ایستگاه زابل با ۸۲۸۳ مورد، بیشترین فراوانی وقوع جست‌باد را داشته و به دنبال آن ایستگاه‌های تبریز، اردبیل، فرودگاه امام خمینی، کرمان و شیراز، به ترتیب با ۳۷۸٦، ۲۳۹۲، ۱۷٦۸، ۱۷٦۱ و ۱۰۱۳ مورد قرار گرفته‌اند.

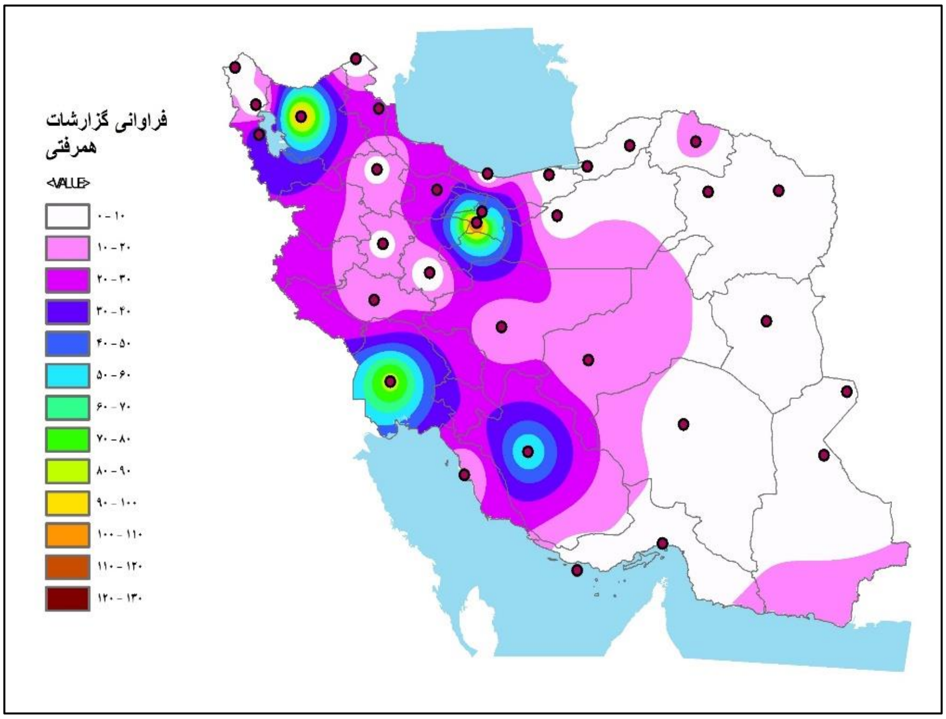
در مجموع این‌گونه به نظر می‌رسد که فراوانی گزارش‌های منطقه جنوب شـرق و شـمال غرب کشـور نسـبت به سایر مناطق بیشتر بوده و کمترین گزارش‌ها مربوط به مناطق شمال و شمال شرق کشور بوده است. از لحاظ فراوانی جست‌بادهای همرفتی (شکل ٤)، ایستگاه فرودگاه امام خمینی با ۱۲۷ مورد بیشترین آمار را به خود اختصاص داده و پس از آن ایســـتگاه‌های تبریز، اهواز، شـــیراز، مهرآباد و ارومیه به ترتیب با ۱۰۳، ۸٤، ۵۸، ٤۲ و ۳۳ مورد قرار دارند.

به‌طورکلی، فراوانی گزارش‌های جست‌باد همرفتی در بازه موردمطالعه در نیمه غربی کشور بیشتر بود. موقعیت مکانی ایستگاه می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در احتمال وقوع جست‌باد داشته باشد. نزدیکی به مناطق کوهستانی و یا وجود موانع طبیعی در اطراف ایستگاه، پوشش سطحی و همین‌طور میزان عبور سامانه‌های ناپایدار جوی از منطقه، تأثیر بسزایی بر احتمال وقوع این پدیده جوی دارند. به‌عنوان‌مثال، ناپایداری‌های ناشی از امواج کوهستان که در ایستگاه هواشناسی فرودگاه تبریز به علت قرارگیری در میان ارتفاعات، به‌دفعات گزارش گردیده است، می‌تواند بر تغییرات ناگهانی سمت و تندی باد و درنتیجه وقوع جست‌باد در این ایستگاه تأثیرگذار باشد. به‌عنوان نمونه دیگر می‌توان به وقوع بادهای شدید و گزارش‌های متعدد جست‌باد در استان سیستان و بلوچستان به‌ویژه ایستگاه زابل اشاره کرد. این بادهای شدید در طول دوره گرم سال به شکل نوسانات و تغییرات چند روزه (حدوداً ۱۲۰ روز) نمود می‌یابند و از منظر شدت و جهت وزش باد از نظم خاصی پیروی نمی‌نمایند. وزش این بادها در منطقه سیستان و بلوچستان علاوه بر احراز خصوصیات یک باد محلی، احراز خصوصیاتی چون افزایش و کاهش نسبتاً ناگهانی شدت باد در زمان آغازگری و خاتمه را داشته که این موضوع حکایت از تأثیرپذیری بسیار زیاد این باد از گردش منطقه‌ای جو در شرق فلات ایران دارد (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۲).

بالاترین تندی جست‌باد گزارش شده در طی دوره موردمطالعه، ۳۴ متر بر ثانیه و مربوط به ایستگاه همدان و در ساعت ۱۳:۰۰ مورخه ۲٤ سپتامبر سال ۲۰۱٦ و از نوع غیرهمرفتی بود. بیشترین تندی جست‌باد همرفتی گزارش شده نیز ۳۰ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه فرودگاه مهرآباد و در ساعت ۱٦:۳۰ روز ٦ نوامبر سال ۲۰۱۸ بود.



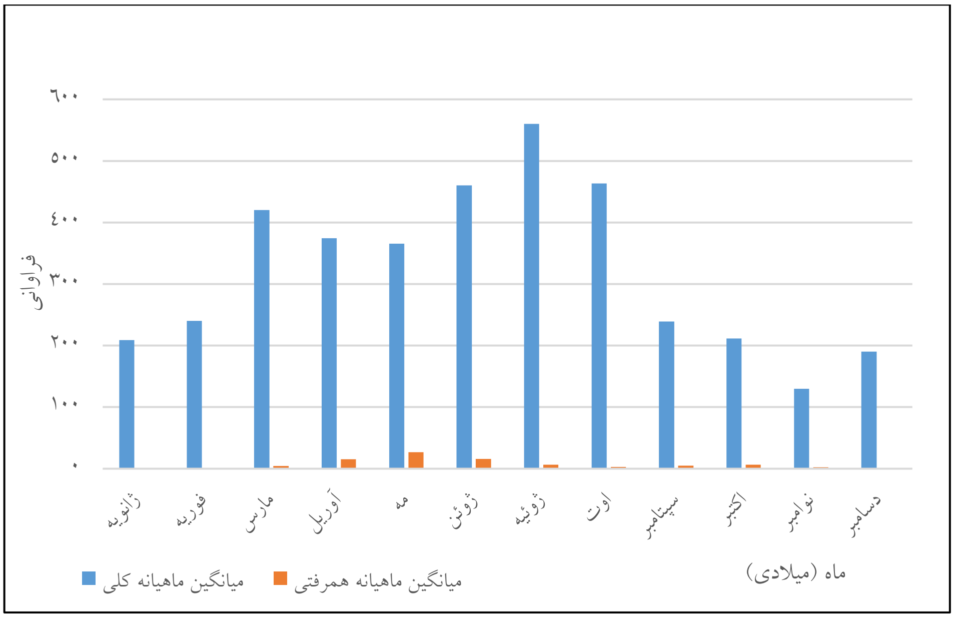
شکل ۳- فراوانی گزارش‌های جست‌باد طی سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ برای ایستگاه‌های موردمطالعه



شکل ٤- فراوانی گزارش‌های جست‌باد همرفتی طی سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ برای ایستگاه‌های موردمطالعه

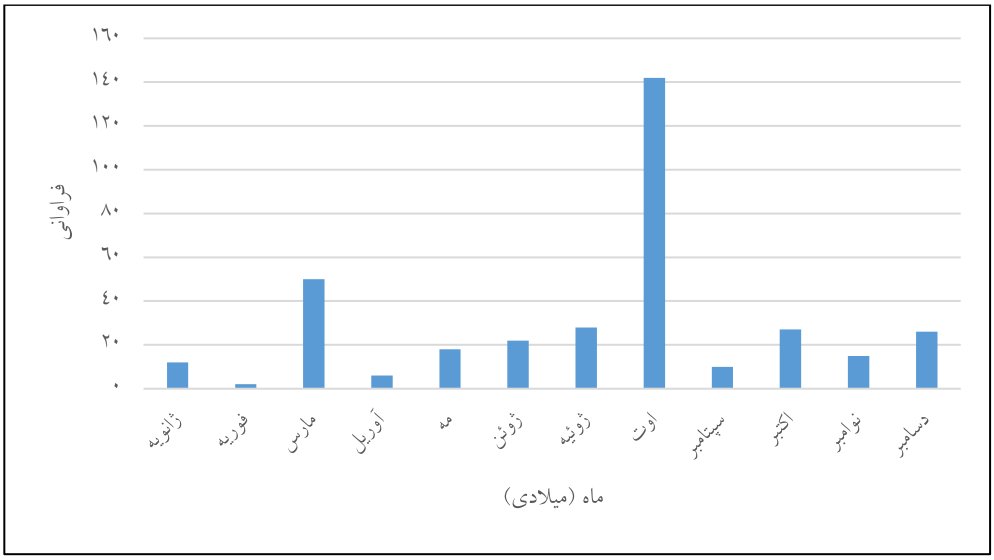
۳-۲- تغییرات سالیانه و ماهیانه جست‌باد

شکل (۵) میانگین ماهیانه فراوانی جست‌بادهای گزارش شده را هم به‌صورت کلی و هم برای جست‌بادهای همرفتی به تفکیک هرماه از سال نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، فراوانی گزارش‌های جست‌باد همرفتی نسبت به جست‌باد غیرهمرفتی به‌مراتب کمتر است. بیشتر جست‌بادهای همرفتی در فصل بهار و ابتدای تابستان گزارش گردیده که این امر می‌تواند به دلیل شرایط مطلوب برای تشکیل همرفت مرطوب عمیق و وقوع تعداد بیشتر توفان‌های تندری در ایران در این فصل از سال باشد که با نتایج تحقیقات قویدل و همکاران (۲۰۱۷) نیز مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد حدود ٦۷ درصد از جست‌بادها (همرفتی و غیر همرفتی) در نیمه اول سال یعنی در فصول بهار و تابستان اتفاق افتاده‌اند. این در حالی است که تنها حدود ۱۳ درصد آن‌ها در فصل پاییز اتفاق افتاده‌اند. همچنین بیشترین فراوانی جست‌باد مربوط به تیرماه با میانگین ۵۵۹ گزارش در طول ماه بوده است. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد به‌صورت کلی فراوانی وقوع جست‌باد در بازه موردمطالعه روندی صعودی داشته و در سال ۲۰۱۸ به بالاترین میزان خود (٤۰۷٦ گزارش در طول سال) رسیده است.



شکل ۵- میانگین ماهیانه فراوانی کل گزارش‌های جست‌باد و فراوانی گزارش‌های جست‌باد همرفتی

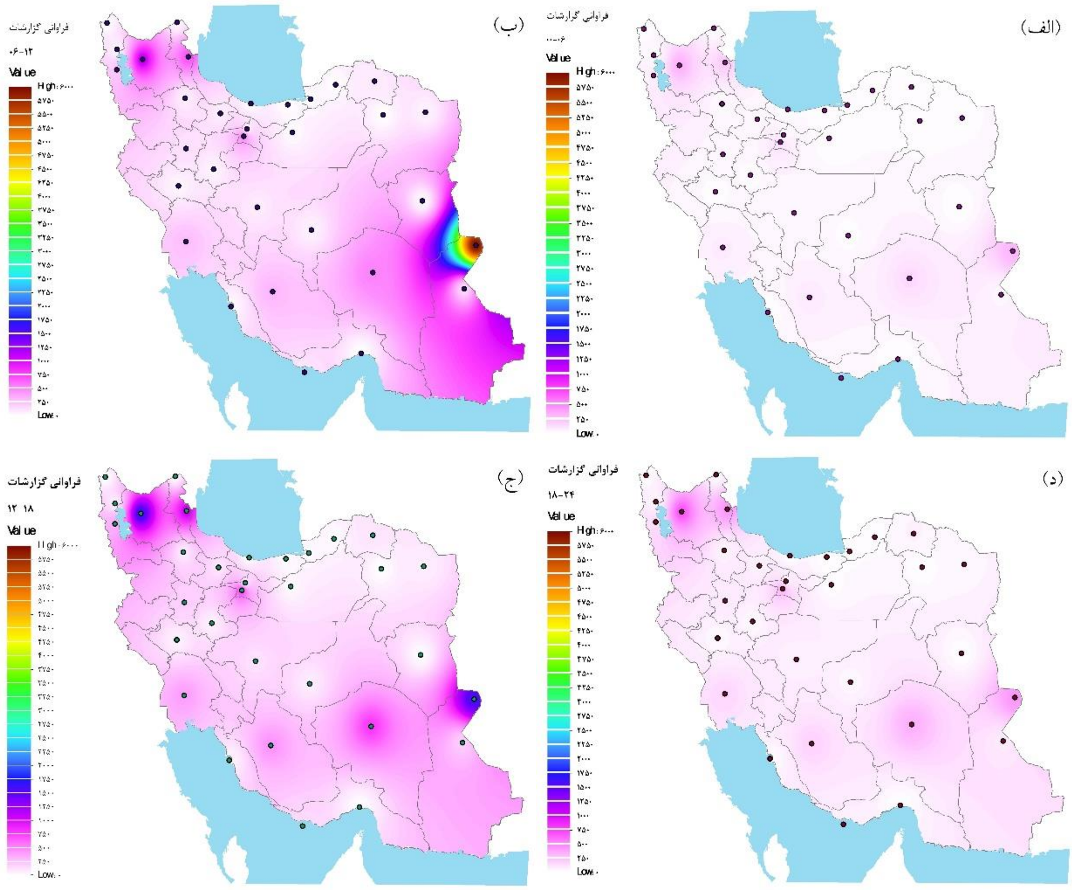
شکل (۶)، میانگین فراوانی گزارش‌های جست‌باد شدید با تندی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه را برای ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. بررسی‌ها حاکی از آن است که فقط حدود ۱/۳ درصد (۳۲۹ مورد) از جست‌بادهای گزارش شده دارای تندی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه و حدود ۹ درصد از آن‌ها دارای تندی بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه بوده‌اند. از ۳۲۹ مورد گزارش ثبت شده جست‌باد شدید با تندی بالای ۲۵ متر بر ثانیه، تعداد ۲۴۳ مورد مربوط به ایستگاه زابل و ۶۲ مورد مربوط به ایستگاه اردبیل بوده که تنها ۱۳ مورد از این گزارش‌ها از نوع همرفتی و سایر موارد از نوع غیرهمرفتی بوده است. فراوانی زیاد گزارش جست‌بادهای شدید در ایستگاه زابل غالباً مربوط به زمان وزش بادهای سیستان بود که بر اساس مطالعات پیشین (علیجانی، ۱۳۷۳ و حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۳۹۵) این بادها در دوره گرم سال یعنی از اواسط خرداد تا اواسط مهرماه به مدت حدوداً ۱۲۰ روز از ارتفاعات شمال‌شرقی به سمت سرزمین‌های جنوب‌شرقی ایران می‌وزد و همان‌طور که اشاره شد می‌تواند افزایش و کاهش ناگهانی شدت باد را باعث شود.



شکل ٦- میانگین ماهیانه فراوانی جست‌باد با تندی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه

۳-۳- تغییرات روزانه جست‌باد

شکل (۷-الف) تا (۷-د) فراوانی وقوع جست‌باد در بازه موردمطالعه برای کلیه ایستگاه‌ها بر اساس ساعت وقوع این پدیده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه زابل، بیشترین فراوانی گزارش جست‌باد در حدود ساعت‌های ۱۲ تا ۱۸ محلی بوده است (شکل ۷-ج). در واقع زمان وقوع این پدیده اکثراً در بعدازظهر است که این می‌تواند به علت ناپایداری بیشتر در لایه‌مرزی به دلیل افزایش دمای سطحی در این زمان از روز باشد. این در حالی است که ایستگاه زابل به دلیل تأثیرپذیری زیاد از بادهای سیستان، دارای شرایط متفاوتی نسبت به سایر ایستگاه‌ها بود. بیشینه سرعت بادهای سیستان در ایستگاه زابل به‌صورت متوسط در حدود ساعت ۰۹:۰۰ اتفاق می‌افتد (حسین‌زاده، ۱۳۷٦، حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۳۹۵) که این عامل می‌تواند علت فراوانی بیشتر گزارش‌های جست‌باد در نزدیکی این ساعت از روز در ایستگاه زابل باشد (شکل ۷-ب).



شکل ۷- فراوانی وقوع جست‌باد در بازه زمانی موردمطالعه برای تمامی ایستگاه‌ها بر اساس ساعات محلی
الف) ۰۶-۰۰ ب) ۱۲-۰۶ ج) ۱۸-۱۲ د) ۲٤-۱۸
(شکل‌ها با استفاده از روش درونیابی کریجینگ توسط نرم‌افزار ArcMap ترسیم شده‌اند)

۳-٤- شدت وقوع جست‌باد

به‌منظور دسته‌بندی جست‌بادها از لحاظ شدت و به‌عنوان مرجعی برای پیش‌بینی سطح خطر و اعلام هشدار و همچنین بر اساس بازه مربوط به تندی داده‌های موجود جست‌باد در ایران، طبقه‌بندی شامل ۳ سطح معرفی گردید. این ۳ سطح با تقریب اندکی برگرفته از طبقه‌بندی شاخص بوفورت[1] بوده و نشان‌دهنده آستانه‌هایی است که شرایط و قدرت وزش باد در آن‌ها به‌صورت محسوس تغییر می‌کند. سطح ۱ شامل جست‌بادهای با سرعت ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه، سطح ۲ شامل جست‌بادهای با سرعت ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه و سطح ۳ شامل جست‌بادهای با سرعت بیش از

1 Beaufort Index

۲۵ متر بر ثانیه است. جست‌بادهای سطح ۳ شامل بالاترین سطح از لحاظ مخاطرات زیست‌محیطی بوده و نیاز به هشداردهی مناسب و اقدامات پیشگیرانه خاص خود را دارند. البته این طبقه‌بندی می‌تواند از منطقه‌ای به منطقه دیگر و بر حسب نیاز متفاوت باشد (کلندویچ و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول (۲)، دسته‌بندی جست‌باد بر اساس بیشینه تندی آن‌ها را نشان می‌دهد. روشن است که هرچه بیشینه تندی جست‌باد افزایش یابد، به‌تبع آن خطرات ناشی از وقوع این پدیده نیز بیشتر خواهد بود. همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است، از مجموع ۲۳۸۳۷ گزارش موجود، ۱۱۲۵۱ گزارش جست‌باد در سطح هشدار ۱، ۲۱۸٤ مورد در سطح هشدار ۲ و ۲٦۸ مورد در سطح هشدار ۳ قرار داشت. فراوانی جست‌بادهای با تندی بالای ۲۵ متر بر ثانیه که از لحاظ شدت در سطح ۳ و رده پدیده‌های بسیار پرمخاطره جوی قرار می‌گیرند، فقط حدود ۱/۱ درصد از گزارش‌ها را به خود اختصاص داده که بیشتر این گزارش‌ها مربوط به مردادماه و ایستگاه زابل بوده است.

جدول ۲- فراوانی گزارش‌های جست‌باد در هر سطح هشدار طی سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸

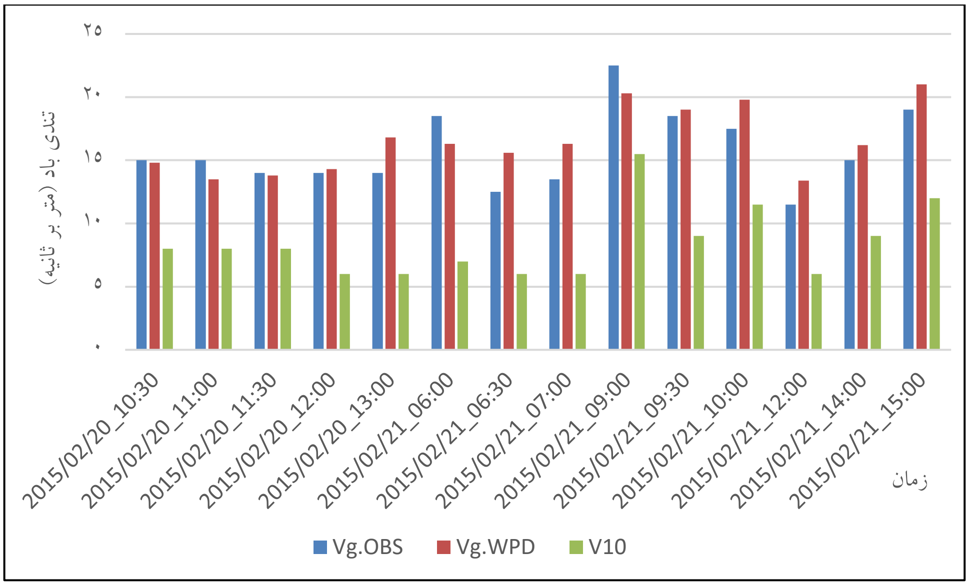
سطح هشدار	بیشینه تندی جست‌باد (متر بر ثانیه)	فراوانی
۱	۲۰–۱۵	۱۱۲۵۱
۲	۲۵-۲۰	۲۱۸٤
۳	> ۲۵	۲٦۸

۳-۵- پیش‌بینی تندی جست‌باد

در ادامه و به‌منظور پیش‌بینی تندی جست‌باد در کشور ایران، مدل WRF با شرایط اشاره شده در بخش ۲-۳ برای ۳۸ تاریخ منتخب (که تعداد گزارش‌های روزانه در آن‌ها نسبت به سایر روزها بیشتر بود) به‌صورت ۲٤ ساعته اجرا گردید. این تاریخ‌ها از سال‌ها و ماه‌های مختلف در طول دوره موردمطالعه انتخاب گردیدند تا تأثیر عوامل فصلی و سالیانه در آن‌ها به حداقل برسد. داده‌های دیدبانی شده و همچنین داده‌های خروجی مدل مورد پیش‌پردازش قرار گرفته و پس از ارزیابی اولیه، درنهایت تعداد ۸۸۵ مورد گزارش جست‌باد غیرهمرفتی طی این ۳۸ روز از ایستگاه‌های مختلف به‌دست آمد. در ادامه مقادیر تندی باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (U_{10}) و ارتفاع لایه‌مرزی (h_{PBL}) از برونداد مدل استخراج و مقادیر تندی باد در سقف لایه‌مرزی (U_{PBL}) بر اساس مقادیر خروجی مدل درون‌یابی شد. کلیه کدنویسی‌های لازم با استفاده از نرم‌افزار NCL نسخه ٦/۵ صورت پذیرفت و درنهایت تندی جست‌باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بر اساس روش WPD (رابطه ۱)، در زمان‌های مورد نظر پیش‌بینی گردید و نتایج با استفاده از داده‌های دیدبانی شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل، مقدار سنجه خطای مطلق میانگین برابر با ۲/۸۳، مقدار سنجه میانگین مربع خطا برابر با ۱۳/٤، مقدار سنجه جذر میانگین مربع خطا برابر با ۳/۲۳ و مقدار سنجه ضریب همبستگی پیرسون نیز برابر با ۰/۷۱ به‌دست آمد. بجز سنجه میانگین مربع خطا که مقدار آن برابر ۱۳/٤ محاسبه گردید، سایر سنجه‌ها عملکرد قابل قبولی را برای روش WPD در پیش‌بینی تندی جست‌باد در کشور ایران نشان دادند.

شکل (۸)، مقادیر تندی باد میانگین (V10)، تندی جست‌باد دیدبانی شده (Vg.OBS) و تندی جست‌باد پیش‌بینی شده از روش WPD (Vg.WPD) را برای ایستگاه کرمان در تاریخ‌های انتخابی ۲۰ و ۲۱ فوریه سال ۲۰۱۵ به‌عنوان یک مطالعه موردی نشان می‌دهد. در طی این ۲ روز، وقوع تندبادهای لحظه‌ای و کاهش دید بر اثر طوفان شن در چندین زمان مختلف در ایستگاه پیش‌گفته گزارش گردیده است. به‌عنوان‌مثال بر اساس اطلاعات هوای حاضر ایستگاه (گزارش اسپیسی)، در ساعت ۰۹:۳۰ روز ۲۱ فوریه، تندی باد میانگین ۹ متر بر ثانیه و تندی جست‌باد ۱۸/۵ متر بر ثانیه بوده است. این امر موجب کاهش دید افقی تا ۵۰۰ متر و وقوع پدیده طوفان شدید گرد و خاک یا شن گردیده است. این در حالی است که در این زمان مقدار تندی جست‌باد پیش‌بینی شده از روش WPD برابر با ۱۹ متر بر ثانیه برآورد گردید.



شکل ۸- نمودار تندی باد میانگین (V10)، تندی جست‌باد دیدبانی شده (Vg.OBS) و تندی جست‌باد پیش‌بینی شده از روش WPD (Vg.WPD) برای ایستگاه کرمان در تاریخ‌های انتخابی ۲۰ و ۲۱ فوریه سال ۲۰۱۵

بر اساس محاسبات انجام شده، نتایج تندی جست‌باد پیش‌بینی شده از روش WPD در مقایسه با داده‌های دیدبانی شده (مشاهداتی) برای ایستگاه کرمان در تاریخ پیش‌گفته دارای خطای مطلق میانگین ۱/٦٦، میانگین مربع خطا ۳/۷۲، جذر میانگین مربع خطا ۱/۹۲ و ضریب همبستگی پیرسون ۰/۷۹ بود که همگی در محدوده قابل قبولی قرار داشتند.

٤- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی توزیع زمانی–مکانی جست‌باد در یک بازه زمانی ۱۵ ساله و بررسی و ارزیابی یک روش تجربی جهت پیش‌بینی این پدیده تحت عنوان WPD در کشور ایران بود. در بخش اول، کلیه اطلاعات جست‌باد از ۳۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی در کشور ایران در طول سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ میلادی جمع‌آوری و از لحاظ زمان و مکان وقوع، نوع و همچنین شدت پدیده، موردبررسی قرار گرفت. داده‌ها مربوط به گزارش‌های متار و اسپیسی تندی باد (گزارش‌های باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین) از ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی ایران بود.

نتایج نشان داد در بازه موردمطالعه، از مجموع ۲۳۸۳۷ مورد گزارش جست‌باد، ایستگاه زابل با ۸۲۸۳ مورد، بیشترین فراوانی وقوع را به خود اختصاص داده و به دنبال آن ایستگاه‌های تبریز، اردبیل، فرودگاه امام خمینی، کرمان و شیراز، به ترتیب با ۳۷۸٦، ۲۳۹۲، ۱۷٦۸، ۱۷٦۱ و ۱۰۱۳ مورد قرار گرفته‌اند. در مجموع این‌گونه به نظر می‌رسد که فراوانی گزارش‌های منطقه جنوب شرق و شمال غرب کشور نسبت به سایر مناطق بیشتر بوده و کمترین گزارش‌ها مربوط به مناطق شمال و شمال شرق کشور بوده است. از لحاظ فراوانی جست‌بادهای همرفتی، ایستگاه فرودگاه امام خمینی با ۱۲۷ مورد بیشترین آمار را به خود اختصاص داده و پس از آن ایستگاه‌های تبریز، اهواز، شیراز، مهرآباد و ارومیه به ترتیب با ۱۰۳، ۸٤، ۵۸، ٤۲ و ۳۳ مورد قرار دارند. به‌طورکلی، فراوانی گزارش‌های جست‌باد همرفتی در بازه موردمطالعه در نیمه غربی کشور بیشتر بود. بیشترین تندی جست‌باد گزارش شده برابر با ۳٤ متر بر ثانیه و مربوط به ایستگاه همدان و از نوع غیرهمرفتی بود. همچنین فراوانی گزارش‌های جست‌باد از سال ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۸ به‌صورت کلی روندی صعودی داشته و سال ۲۰۱۸ بیشترین فراوانی وقوع جست‌باد را به خود اختصاص داده است. میان نتایج این مطالعه و نتایج حاصل از مطالعات گذشته، همخوانی و ارتباط مناسبی برقرار است. مشابه با نتایج فریرا و ناسیمنتو (۲۰۱٦) اغلب جست‌بادهای گزارش شده در بین ساعت‌های ظهر تا بعدازظهر (۱۲ تا ۱۸ محلی) به ثبت رسیده‌اند و از لحاظ زمانی نیز اغلب جست‌بادها در نیمه اول سال اتفاق افتاده‌اند که نتایج حاصل‌شده با نتایج کلندویچ و همکاران (۲۰۱٦) همخوانی دارد. بررسی‌ها نشان داد که فقط حدود ۱/۳ درصد (۳۲۹ مورد) از جست‌بادهای گزارش شده دارای تندی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه و حدود ۹ درصد از آن‌ها دارای تندی بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه بوده‌اند.

در بخش دوم مطالعه به بررسی و ارزیابی روشی تجربی تحت عنوان WPD جهت پیش‌بینی تندی جست‌باد غیرهمرفتی با استفاده از برونداد مدل WRF در کشور ایران پرداخته شد. مدل با شرایط اولیه و فیزیک انتخابی برای

۳۸ تاریخ تعیین شده به‌صورت ۲٤ ساعته اجرا و کمیت‌های موردنیاز از برونداد مدل استخراج گردید. درنهایت نتایج پیش‌بینی تندی جست‌باد حاصل از روش WPD با استفاده از داده‌های دیدبانی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، مقدار سنجه خطای مطلق میانگین برابر با ۲/۸۳، مقدار سنجه میانگین مربع خطا برابر با ۱۳/٤، مقدار سنجه جذر میانگین مربع خطا برابر با ۳/۲۳ و مقدار سنجه ضریب همبستگی پیرسون نیز برابر با ۰/۷۱ به‌دست آمد. به‌جز سنجه میانگین مربع خطا که مقدار آن برابر ۱۳/٤ محاسبه گردید، سایر سنجه‌ها عملکرد قابل قبولی را برای روش WPD در پیش‌بینی تندی جست‌باد نشان دادند. در مجموع می‌توان عملکرد روش WPD در پیش‌بینی تندی جست‌باد غیرهمرفتی در کشور ایران را مطلوب ارزیابی کرد.

لازم به توضیح است که این تحقیق به‌منظور به‌دست آوردن شناختی اولیه از چگونگی شکل‌گیری، توزیع زمانی- مکانی، شدت و امکان پیش‌بینی پدیده جست‌باد در ایران با استفاده از برونداد مدل WRF صورت گرفته که علی‌رغم اهمیت زیاد این پدیده، تا کنون به این شکل در کشور انجام نگرفته بود. نتایج این تحقیق می‌تولند به‌عنوان مقدمه مطالعات آینده در زمینه پیش‌بینی وقوع جست‌باد در ایران مورداستفاده قرار گیرد. همچنین تشخیص موقعیت زمانی- مکانی وقوع جست‌باد و پیش‌بینی آن، در کنار شناخت سازوکار شکل‌گیری این پدیده می‌تواند به کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و اقدامات پیشگیرانه در این خصوص کمک کند. پیشنهاد می‌گردد در آینده مطالعاتی در خصوص ارزیابی عملکرد سایر روش‌های موجود پیش‌بینی جست‌باد ازجمله روش‌های فیزیکی (مانند روش برسر) و آماری (مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشینی و شبکه عصبی مصنوعی) صورت پذیرد.

قدردانی

نگارندگان این مقاله از سازمان هواشناسی ایران برای همکاری سازنده و در اختیار قرار دادن داده‌های موردنیاز ایستگاه‌های هواشناسی، کمال تشکر را دارند.

کتابنامه

حسین‌زاده، سیدرضا. (۱۳۷٦). بادهای ۱۲۰روزه سیستان، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ٤٦، ۱۰۲-۱۲۷.
https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/144149/

حمیدیان‌پور، محسن؛ مفیدی، عباس؛ سلیقه، محمد. (۱۳۹۵). تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰، (۲)، ۸۳-۱۰۹. https://www.ijgeophysics.ir/article_33350.html

علیجانی، بهلول. (۱۳۷۳). آب و هوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۲۳٦ ص.
https://www.ketabcity.com/bookview.aspx?bookid=1837223

محمدی، محمد حسام؛ مشکوتی، امیرحسین؛ قادر، سرمد؛ آزادی، مجید. (۱۳۹۹). بررسی آماری جست‌بادهای همرفتی و غیرهمرفتی در محدوده ایران، مجموعه مقالات نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، آبان ۱۳۹۹، ۹۱-۸۸.
https://www.nigsconference.ir/article_4098.pdf

محمدی، محمد حسام؛ مشکوتی، امیرحسین؛ قادر، سرمد؛ آزادی، مجید. (۱۳۹۹). پیش‌بینی تندی جست‌باد در ایران با استفاده از مدل WRF، مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس ملی فرماندهی و کنترل ایران، آذر ۱۳۹۹.
https://civilica.com/doc/1243770
مفیدی، عباس؛ حمیدیان‌پور، محسن؛ سلیقه، محمد؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۲). تعیین زمان آغاز، خاتمه و طول مدت وزش باد سیستان با بهره‌گیری از روش‌های تخمین نقطه تغییر، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۸ صص. ۱۱۲-۸۷. https://geoeh.um.ac.ir/article_38890.html

Brasseur, O. 2001. Development and Application of a Physical Approach to Estimating Wind Gusts, Monthly Weather Review, 129 (1): 5-25. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2

Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, 2011. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 742 PP, edition 2. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119992714

Choi, E. C. C., Hidayat, F. A., 2002. Gust factors for thunderstorm and non-thunderstorm winds. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90 (12): 1683–1696. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00279-9

Cook, N. J., Harris, R. I., and Whiting, R., 2003. Extreme wind speeds in mixed climates revisited. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91 (3): 403– 422. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00397-5

De Meutter, P., Gerard, L., Smet, G., Hamid, K., Hamdi, R., Degrauwe, D., and Termonia, P., 2015. Predicting small-scale, short-lived downbursts: case study with the NWP limited-area ALARO model for the Pukkelpop thunderstorm. Mon. Weather Rev., 143 (3): 742–756. https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00290.1

Ferreira, V., Nascimento, E., 2016. Convectively-Induced Severe Wind Gusts in Southern Brazil, Surface Observations. Atmospheric Environment, and Association with Distinct Convective Modes: 28th Conference on Severe Local Storms, At Portland/OR, USA. https://ams.confex.com/ams/28SLS/webprogram/Paper299442.html

Ghavidel, Y., Baghbanan, P., Farajzadeh, M., 2017. The spatial analysis of thunderstorm hazard in Iran. Arabian Journal of Geosciences. 10 (5): 1-13. http:// doi.org/10.1007/s12517-017-2902-7

Jolliffe, I. T., and D. B. Stephenson, 2003. Forecast Verifcation: A Practitioner’s Guide in Atmospheric Science. John Wiley and Sons, 240pp. http://doi.org/10.1002/9781119960003

Kolendowicz, L., Taszarek, M., Czernecki, Bartosz., 2016. Convective and non-convective wind gusts in Poland, 2001-2015. Meteorology Hydrology and Water Management. 4 (2): 15-21. https://doi.org/10.26491/mhwm/63636

Kurbatova, M., Konstantin, R., Gubenko, I. and Kurbatov, G., 2018. Comparison of seven wind gust parameterizations over the European part of Russia. Advances in Science and Research, 15: 251-255. https://doi.org/10.5194/asr-15-251-2018

Mohr, S., Kunz, M., Richter, A., and Ruck, B., 2017. Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany. Natural Hazards and Earth System Sciences, 17 (6): 957-969. https://doi.org/10.5445/IR/1000071814

NCO, 1997. Subroutine calgust, Available from the National Weather Service, NCO Production, source code: https://github.com/ERA-URBAN/UPP/blob/master/src/unipost/CALGUST.f

RUC20, 2007. diagnostic output fields for the Rapid Refresh and HRRR, Available from the National Oceanic and Atmospheric Administration website:

https://rapidrefresh.noaa.gov/RAP_var_diagnosis.html
Sheridan, P., 2011. Review of Techniques and Research for Gust Forecasting and Parameterisation, Forecasting Research Technical Report 570, Met Office, Exeter. https://www.researchgate.net/publication/268744498_Review_of_techniques_and_research_for_gust_forecasting_and_parameterisation
Skamarock W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR THECNICAL NOTE. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf
Stucki, P., Dierer, S., Welker, C., Navarro, J. J. G., Raible, C. C., Martius, O. and Brönnimann, S., 2016. Evaluation of downscaled wind speeds and parameterised gusts for recent and historical windstorms in Switzerland. Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography, 68 (1). https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusa.v68.31820